

## บทที่ 3 ทฤษฎีพื้นฐาน

การศึกษาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อชนิดแบบสปริงติดครีป จะต้องมีความเข้าใจในส่วนประกอบพื้นฐาน และหลักการทำงานของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน รวมทั้งทฤษฎีและหลักการเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนและกระบวนการปรับอากาศ ดังนี้

### 3.1 หลักการถ่ายเทความร้อน

#### 3.1.1 รูปแบบการถ่ายเทความร้อน (Modes of heat transfer)

การถ่ายเทความร้อนแบ่งออกได้เป็นสามลักษณะได้แก่ การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน

##### 3.1.1.1 การนำความร้อน (Heat conduction)

การนำความร้อนคือกระบวนการที่ความร้อน (พลังงานที่เคลื่อนที่ด้วยอิทธิพลของอุณหภูมิที่แตกต่างกัน) เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางชนิดเดียวหรือหลายชนิดซึ่งมีอุณหภูมิต่างกัน จากอุณหภูมิสูงไปยังอุณหภูมิต่ำกว่า โดยโมเลกุลของตัวกลางจะเกิดการสั่นแต่จะไม่เคลื่อนที่ ในตัวกลางที่เป็นของแข็งทึบแสงหรือเป็นของไหลที่อยู่นิ่ง การนำความร้อนจะเกิดได้ดีและจะดีมากในโลหะเพราะจะมีโมเลกุลเล็กๆ เคลื่อนที่ได้ด้วย อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนสามารถหาได้โดยอาศัย Fourier's law ซึ่งเขียนเป็นรูปสมการได้ดังนี้

$$q_x = -kA \frac{dT}{dx} \quad (3.1)$$

|       |                 |                                                                   |
|-------|-----------------|-------------------------------------------------------------------|
| เมื่อ | $q_x$           | คือ อัตราการนำความร้อนในทิศทาง x (W)                              |
|       | $A$             | คือ พื้นที่ของการนำความร้อนในทิศทางตั้งฉากกับ x ( $m^2$ )         |
|       | $k$             | คือ ค่าการนำความร้อนของวัสดุ (Thermal conductivity) ( $W / m.K$ ) |
|       | $\frac{dT}{dx}$ | คือ เกรเดียนต์ของอุณหภูมิ ณ จุดที่พิจารณา ( $K / m$ )             |

ค่าการนำความร้อนเป็นสมบัติของวัสดุซึ่งสามารถหาค่าได้จากตารางหรือแผนภูมิในกรณีที่มีรายละเอียดของวัสดุที่เกี่ยวข้อง ในกรณีที่ไม่มีรายละเอียดของวัสดุโดยคร่าวๆ ก็อาจจะต้องหาค่าการนำความร้อนโดยการทดลองซึ่งโดยทั่วไปโลหะจะมีค่าการนำความร้อนสูงกว่าอโลหะ

### 3.1.1.2 การพาความร้อน (Heat convection)

การพาความร้อนเป็นการถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากการเคลื่อนพาของของไหล โดยเฉพาะอย่างยิ่งการถ่ายเทความร้อนระหว่างพื้นผิวของของแข็งกับของไหลที่พัดผ่านไปบนพื้นผิวของของแข็งนั้น อัตราการพาความร้อนสามารถคำนวณหาได้โดยใช้กฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's law of cooling)

$$q = Ah(T_w - T_f) \quad (3.2)$$

|       |       |                                             |
|-------|-------|---------------------------------------------|
| เมื่อ | $q$   | คือ อัตราการพาความร้อน (W)                  |
|       | $A$   | คือ พื้นที่ของการพาความร้อน ( $m^2$ )       |
|       | $h$   | คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $W/m^2.K$ ) |
|       | $T_w$ | คือ อุณหภูมิพื้นผิวของของแข็ง (K)           |
|       | $T_f$ | คือ อุณหภูมิของของไหล (K)                   |

การพาความร้อนสามารถแบ่งตามลักษณะการไหลได้สองแบบคือ

- การพาความร้อนแบบบังคับ (Forced convection) คือการถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวของของแข็งและของไหล โดยถูกของไหลบังคับให้ไหลไปตามช่องทางโดยแรงภายนอก (เช่น ในพัดลมและปั๊ม) มีทั้งแบบไหลภายในท่อ (Internal flow) และไหลภายนอกท่อ (External flow)
- การพาความร้อนแบบอิสระ (Free convection) เกิดขึ้นเมื่อการเคลื่อนที่ของของไหลไม่ได้เกิดจากการบังคับโดยกลไกจากภายนอก แต่เกิดขึ้นเองภายในของไหลจากการผลักดันของแรงลอยตัวในของไหล แรงลอยตัวนี้เป็นผลจากความแตกต่างของความหนาแน่นในของไหลซึ่งเกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิอีกต่อหนึ่ง กล่าวคือเมื่อมีการถ่ายเทความร้อนระหว่างพื้นผิวของแข็งกับของไหล ทำให้อุณหภูมิของของไหลไม่เท่ากันสม่ำเสมอ เช่น ในการให้ความร้อนแก่ของไหลจากพื้นผิวให้ความร้อนนั้น ของไหลที่อยู่ติดกับพื้นผิวจะมีอุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้ความหนาแน่นลดลงจึงลอยตัวขึ้น ของไหลส่วนอื่นที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าและความหนาแน่นมากกว่าจะเคลื่อนที่เข้ามาแทน ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของของไหลขึ้น

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนมีค่าแตกต่างกันมาก โดยสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบบังคับมีค่าสูงกว่าประสิทธิภาพการพาความร้อนแบบอิสระมาก และสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในของเหลวจะมีค่าสูงกว่าในแก๊สมาก ซึ่งเป็นผลโดยตรงของความหนาแน่น นอกจากนี้การถ่ายเทความร้อนในขณะที่มีการเปลี่ยนสถานะ เช่น จากของเหลวกลายเป็นไอ (การเดือด) หรือจากไอกลายเป็นของเหลว (การควบแน่น) จะมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูงมาก เมื่อเทียบกับในกรณีที่ไม่มีการเปลี่ยนสถานะ

### 3.1.1.3 การแผ่รังสี(Radiation)

ในการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อนนั้น เป็นการส่งความร้อนไปในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งเคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วแสง การแผ่รังสีความร้อนสามารถผ่านสุญญากาศได้ ซึ่งต่างจากการนำความร้อนและการพาความร้อนที่จะต้องอาศัยตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน พลังงานการแผ่รังสีที่ปลดปล่อยจากวัตถุสามารถคำนวณได้จาก Steafan-Boltzman's law คือ

$$q_{rad} = A\varepsilon\sigma T^4 \quad (3.3)$$

เมื่อ  $q_{rad}$  คือ อัตราการเปล่งพลังงานรังสี (W)  
 $A$  คือ พื้นที่ผิวที่เปล่งพลังงานรังสี ( $m^2$ )  
 $\varepsilon$  คือ สภาพการเปล่งรังสีของพื้นผิวมีค่าระหว่าง 0 ถึง 1  
 $\sigma$  คือ ตัวค่าคงที่ Steafan-Boltzman's มีค่าเท่ากับ  $5.67 \times 10^{-8} (W / m^2 K^4)$   
 $T$  คือ อุณหภูมิของพื้นผิว (K)

จะเห็นว่าอัตราการเปล่งพลังงานรังสีเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิยกกำลังสี่ ตามปกติการแผ่รังสีความร้อนจะมีค่าน้อยคืดทั้งได้ เว้นแต่เมื่อพื้นผิวมีอุณหภูมิสูงมาก การแผ่รังสีความร้อนมีความสำคัญเช่นกันในระบบอุณหภูมิต่ำมาก ๆ ซึ่งได้มีการทำให้เป็นสุญญากาศเพื่อจัดการนำความร้อนและการพาความร้อน

## 3.1.2 การวิเคราะห์การพาความร้อนทั่วไป

ในกรณีส่วนมากของการพาความร้อนจะไม่สามารถแก้สมการได้โดยง่าย ทั้งนี้เพราะสมการมีความซับซ้อนมาก และ/หรือการไหลเป็นแบบปั่นป่วน (Turbulent) ซึ่งไม่สามารถอธิบายด้วยสมการได้สะดวก ดังนั้นจึงอาศัยการทดลองเป็นหลัก เพื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (h) กับตัวแปรอื่นๆที่เกี่ยวข้องกับการไหลของของไหล ความสัมพันธ์เหล่านี้มักอยู่ในรูปของ Reynolds number (Re), Nusselt number (Nu), Prandtl number (Pr) และ Grashof number (Gr) ซึ่งเป็นกลุ่มตัวแปรไร้มิติ นิยามดังนี้

### 3.1.2.1 Reynolds number (Re)

คืออัตราส่วนของแรงจากความเฉื่อยต่อแรงจากความหนืด ใช้แบ่งช่วงลักษณะการเคลื่อนที่ของของไหลเป็นช่วงไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) และแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) ซึ่งการไหลทั้งสองแบบนี้มีผลต่อผลต่อการพาความร้อนมาก ค่าเรย์โนลด์ของการไหลในท่อมักมีค่าเป็น

$$Re_D = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{V D}{\nu} \quad (3.4)$$

เมื่อ  $Re_D$  คือ เรย์โนลด์นัมเบอร์ที่หาจากเส้นผ่านศูนย์กลาง  $D$  ของท่อ

- $V$  คือ ความเร็วเฉลี่ยของของไหลภายในท่อ ( $m/s$ )  
 $D$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ ( $m$ )  
 $\rho$  คือ ความหนาแน่นของของไหล ( $kg/m^3$ )  
 $\mu$  คือ ความหนืดไดนามิกส์หรือความหนืดสัมบูรณ์ ( $N.s/m^2$ )  
 $\nu$  คือ ความหนืดคินแมติกส์,  $\mu/\rho$  ( $m^2/s$ )

### 3.1.2.2 Nusselt number (Nu)

นัสเซิลต์นัมเบอร์เป็นสัมประสิทธิ์การพาความร้อนไร้มิติที่สำคัญ สำหรับการไหลในท่อนัสเซิลต์นัมเบอร์มีความสัมพันธ์เป็น

$$\overline{Nu}_D = \frac{\bar{h}_c D}{k} \quad (3.5)$$

- เมื่อ  $\overline{Nu}_D$  คือ ค่านัสเซิลต์นัมเบอร์เฉลี่ยที่หาจากเส้นผ่านศูนย์กลาง  $D$  ของท่อ  
 $\bar{h}_c$  คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ยในท่อ ( $W/m^2.K$ )  
 $D$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ ( $m$ )  
 $k$  คือ ค่าการนำความร้อนของของไหล ( $W/m.K$ )

### 3.1.2.3 Prandtl number (Pr)

คือสัดส่วนระหว่างค่าความหนืดจลศาสตร์ (Kinematic viscosity) กับค่าคุณสมบัติการกระจายความร้อน (Thermal diffusivity) ของของไหล ดังความสัมพันธ์

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu C_p}{k} \quad (3.6)$$

- เมื่อ  $Pr$  คือ แพรินเดิลนัมเบอร์  
 $\nu$  คือ ความหนืดคินแมติกส์,  $\mu/\rho$  ( $m^2/s$ )  
 $\alpha$  คือ ค่าการแพร่ความร้อน ( $m^2/s$ )  
 $\mu$  คือ ความหนืดไดนามิกส์หรือความหนืดสัมบูรณ์ ( $N.s/m^2$ )  
 $C_p$  คือ ค่าความร้อนจำเพาะของของไหลที่ความดันคงที่ ( $J/kg.K$ )  
 $k$  คือ ค่าการนำความร้อนของของไหล ( $W/m.K$ )

Prandtl number จึงมีความสัมพันธ์กับการกระจายอุณหภูมิ (Temperature distribution) และความเร็วที่เปลี่ยนแปลง (Velocity distribution) ของของไหล ถ้าค่า  $Pr$  มีค่าน้อยกว่าหนึ่ง เส้นความลาดเอียงของอุณหภูมิ (Temperature gradient) ของของไหลที่ใกล้ผนังท่อจะชันหรือลาดเท (Slope) น้อยกว่าเส้นความลาดเอียงของความเร็ว (Velocity gradient) ในลักษณะเดียวกันถ้า  $Pr$  มีค่ามากกว่าหนึ่ง เส้นความ

ลาดเอียงของอุณหภูมิจะมีความลาดเอียงมากกว่าเส้นความลาดเอียงของความเร็ว และที่ Pr เท่ากับหนึ่ง ลักษณะของเส้นความเร็วและอุณหภูมิจะคล้ายกัน

#### 3.1.2.4 Grashof number (Gr)

คืออัตราส่วนระหว่างแรงลอยตัวกับแรงจากความเสียดทาน ซึ่งเป็นตัวแปรไร้มิติที่ใช้ในการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลสำหรับการพาความร้อนแบบอิสระ ความสัมพันธ์เป็นดังนี้

$$Gr_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu^2} \quad (3.7)$$

เมื่อ  $Gr_L$  คือ กราซ็อฟนัมเบอร์

$g$  คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก ( $9.8 \text{ m/s}^2$ )

$\beta$  คือ สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงความร้อน ( $K^{-1}$ )

$T_s$  คือ อุณหภูมิผิว ( $K$ )

$T_\infty$  คือ อุณหภูมิของของไหล ( $K$ )

$L$  คือ ความยาวเฉพาะ ( $m$ )

$\nu$  คือ ความหนืดคินแมติกส์ ( $m^2/s$ )

สำหรับการพาความร้อนแบบบังคับ (Forced convection) ความสัมพันธ์จะอยู่ในรูป

$$Nu = f(Re, Pr) \quad (3.8)$$

สำหรับการพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Natural convection) ความสัมพันธ์จะอยู่ในรูปของ

$$Nu = f(Gr, Pr) \quad (3.9)$$

เนื่องจากค่า  $Nu$  หรือ  $h$  ในสมการเหล่านี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของของไหล ( $k, \rho, \mu, c, \beta$ ) และคุณสมบัติเหล่านี้แปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิของของไหล ดังนั้นในสถานการณ์ที่อุณหภูมิของของไหลมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมาก ค่า  $h$  ระหว่างพื้นผิวกับของไหลก็จะเปลี่ยนไป

## 3.2 ครีกระบายความร้อน

### 3.2.1 หน้าที่และชนิดของครีบ

วิศวกรมักจะประสบปัญหาในการถ่ายเทความร้อน อันมีสาเหตุมาจากขีดจำกัดในการเพิ่มสัมประสิทธิ์การพาความร้อน และการมีพื้นที่ที่จำกัดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อน จากสมการ  $Q = hA(T_h - T_c)$  จะเห็นว่า วิธีหนึ่งที่จะเพิ่มอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนก็คือ โดยการเพิ่มพื้นที่ใช้ในการระบายความร้อน (A) และวิธีการง่ายๆ ที่จะเพิ่มอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อน ก็คือ ติดโลหะแผ่นบางๆ ที่เรียกว่าครีบ เข้ากับผิวของผนังโลหะเดิมเพื่อเพิ่มพื้นที่ขึ้น เนื่องจากว่าแผ่นโลหะที่ติดเพื่อเพิ่มพื้นที่ขึ้นนี้ ต้องเสียความร้อนให้แก่อากาศรอบๆ จึงมีอุณหภูมิไม่เท่ากับอุณหภูมิของผิวโลหะเดิม ดังนั้นการเพิ่มพื้นที่ขึ้น 10 เท่า จึงไม่จำเป็นว่าการถ่ายเทความร้อน จะต้องเพิ่มขึ้น 10 เท่า ด้วย ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของพื้นที่ที่เพิ่มพื้นที่ขึ้นขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของพื้นที่ดังกล่าว ซึ่งเป็นเรื่องสำคัญที่จะต้องศึกษา มีวิธีที่จะจำแนกครีบอยู่สองวิธีคือ จำแนกโดยใช้ลักษณะของรูปตัดของครีบและจำแนกตามรูปร่างของครีบ

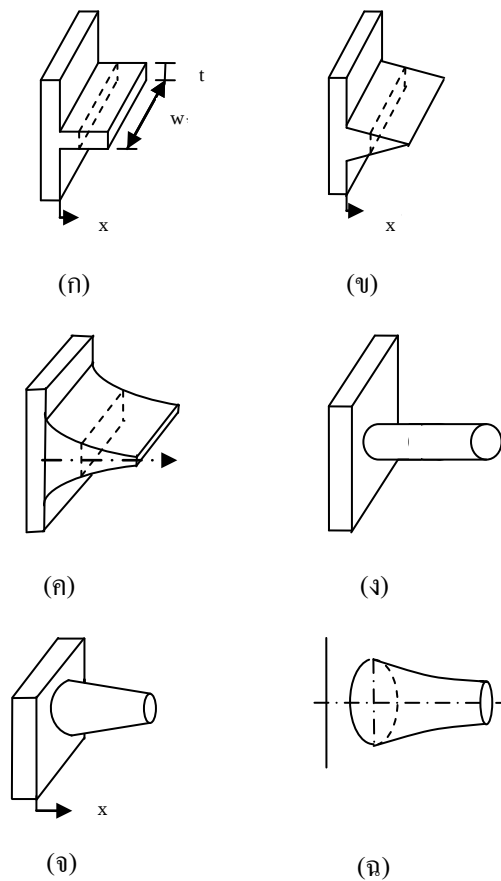
ครีบแบ่งออกตามลักษณะรูปตัดได้ดังนี้คือ

1. ครีบที่มีหน้าตัดสม่ำเสมอ (Fin of uniform cross section) ดังแสดงในรูปที่ 3.1(ก) (ครีบแท่ง หรือ Bar fin) และรูปที่ 3.1(ง) (ครีบริ้วเข็มหมุดหรือ Pin fin)
2. ครีบที่มีหน้าตัดไม่สม่ำเสมอ (Fin of non-uniform cross section) ดังแสดงในรูปที่ 3.1(ข), 3.1(ค), 3.1(จ), 3.1(ฉ)

ครีบแบ่งออกตามลักษณะรูปตัดได้ดังนี้คือ

1. ครีบแท่ง (Bar fin)
2. ครีบกกลม (Circular fin)
3. ครีบลีเหลี่ยมจัตุรัส (Square fin)
4. ครีบลีเหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular fin)

ในบางครั้ง เราอาจจะต้องการเพิ่มการระบายความร้อนทางด้านในของท่อซึ่งอาจทำได้โดยใช้ครีบภายใน (Internal fin)



รูปที่ 3.1 ครีปที่มีลักษณะหน้าตัดต่างๆกัน

### 3.2.2 สมรรถนะของครีป

ผู้ออกแบบใช้ครีปเพื่อเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนจากผนังที่สัมผัสกับของไหลที่มีอุณหภูมิ  $T_\infty$  ที่ไหลผ่านผนังเปล่า (Bare) ที่มีอุณหภูมิ  $T_b$  คงที่ อัตราการถ่ายเทความร้อนจากผนังจะขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $h$ ) ซึ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นโดยการเพิ่มความเร็วของของไหลแต่จะต้องเสียค่าใช้จ่ายมากในการซื้อเครื่องมือกล วิธีที่ไม่ต้องใช้เครื่องมือกลก็คือการใช้ครีปยื่นออกมาจากผนังเข้าสู่ของไหล ความยาวของครีปจะเป็นตัวต้านทานต่อการนำความร้อนจากผิวเปล่า ดังนั้นทำให้ไม่แน่ใจว่าการเพิ่มพื้นที่ผิวการพาความร้อนจะช่วยให้มีการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น วิธีที่ช่วยให้เกิดความมั่นใจก็คือการหาค่าสมรรถนะของครีปซึ่งมี 2 แบบดังนี้

1) ประสิทธิภาพของครีป (Fin effectiveness) ซึ่งนิยามให้เป็นอัตราส่วนของอัตราการถ่ายเทความร้อนเมื่อมีครีปต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนเมื่อไม่มีครีปดังนี้

$$\varepsilon_f = \frac{Q_f}{hA_c\theta_b} \quad (3.10)$$

2) ประสิทธิภาพของครีป (Fin efficiency) คือ อัตราส่วนระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนจากครีปจริงต่อความร้อนที่ควรจะถ่ายเทถ้าครีปมีอุณหภูมิที่ฐาน

$$\eta_f = \frac{Q_f}{Q_{\max}} = \frac{Q_f}{hA_f\theta_b} \quad (3.11)$$

|       |                             |                                                        |
|-------|-----------------------------|--------------------------------------------------------|
| เมื่อ | $Q_f$                       | คือความร้อนที่ถ่ายเทจริงโดยครีบ (kW)                   |
|       | $Q_{\max}$                  | คือความร้อนที่ควรจะถ่ายเทถ้าครีบมีอุณหภูมิพื้นฐาน (kW) |
|       | $A_f$                       | คือ พื้นที่ผิวของครีบ ( $m^2$ )                        |
|       | $\theta_b = T_b - T_\infty$ | (K)                                                    |

### 3.3 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

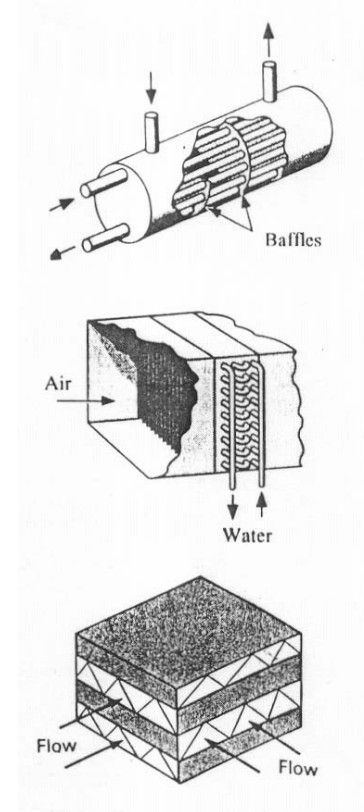
#### 3.3.1 หลักการทำงานของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) เป็นอุปกรณ์ที่มีการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปซึ่งมีอุณหภูมิแตกต่างกัน ส่วนใหญ่แล้วจะมีผนังกั้นระหว่างของไหลไม่ให้ปะปนกัน ความร้อนจะถูกถ่ายเทจากของไหลที่มีอุณหภูมิสูงผ่านผนังไปยังของไหลที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ตัวอย่างอุปกรณ์ประเภทนี้ได้แก่ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ (Shell and tube heat exchanger) หม้อน้ำรถยนต์ (Automobile radiator) ชุดคอนเดนเซอร์ (Condenser) เป็นต้น นอกจากนี้ของไหลที่แลกเปลี่ยนความร้อนอาจสัมผัสกันโดยตรง ของไหลที่แลกเปลี่ยนความร้อนกันในอุปกรณ์ประเภทนี้จะต้องไม่ผสมและไม่รวมตัวกันเมื่อสัมผัสกัน ตัวอย่างเช่น น้ำและอากาศในหอผึ่งความเย็น (Cooling tower) อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลายในระบบต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการทางความร้อน เช่น ในระบบระบายความร้อนต่างๆ ระบบปรับอากาศ ระบบทำความเย็นและระบบที่มีการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ประโยชน์ เป็นต้น งานทั่วไปทางวิศวกรรมที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ได้แก่ การเลือกใช้และการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนให้เหมาะสมกับการใช้งาน วิศวกรจะต้องตัดสินใจที่จะเลือกชนิด และระบุรายละเอียดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน รูปที่ 3.2(a) เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ (Shell and tube heat exchanger) ซึ่งใช้กันทั่วไปสำหรับการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลสองชนิด โดยที่ของไหลหนึ่งจะไหลเข้าไปในท่อ (Tube side fluid) ในขณะที่อีกของไหลหนึ่งไหลข้างนอกท่อ (Shell side fluid) อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในรูปที่ 3.2(a) มีสองกลีบ (Two tube passes) ซึ่งหมายความว่าของไหลจะไหลภายในท่อทิศทางหนึ่งและไหลกลับในอีกทิศทางหนึ่งในระยะทางที่เท่ากัน ด้านหัวของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนทางด้านซ้ายมือจะติดตั้งตัวแยก (Separator) เพื่อแยกของไหลที่ไหลเข้าและไหลกลับออกมา ตัวกั้น (Baffle) ถูกจัดวางในเปลือก เพื่อให้ของไหลไหลผ่านท่อหลายๆ ครั้ง ก่อนที่จะออกจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

(a) อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ  
(Shell and tube heat exchanger)

(b) อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดท่อมีครีบริบ  
(Finned coil heat exchanger)

(c) อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบกะทัดรัด  
(Compact heat exchanger)



รูปที่ 3.2 ตัวอย่างของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบขดท่อมีครีบริบ (Finned coil heat exchanger) ในรูป 3.2(b) เป็นชนิดที่ถูกเลือกใช้บ่อยๆ สำหรับการถ่ายเทความร้อนระหว่างแก๊สและของเหลว เนื่องจากความต้านทานการถ่ายเทความร้อนด้านแก๊สจะสูง ทำให้มีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนต่ำจึงจำเป็นต้องเพิ่มครีบริบทางด้านที่แก๊สผ่าน เพื่อเพิ่มพื้นที่การระบายความร้อน อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิดที่ 3 ดังแสดงในรูปที่ 3.2(c) เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบกะทัดรัด (Compact heat exchanger) โดยทั่วไปแล้วจะประกอบด้วยแผ่นโลหะลักษณะย่นหลายๆแผ่น และของไหลสองชนิดจะไหลผ่านสลับช่องกันระหว่างแผ่นโลหะ ในการเลือกอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ยกตัวอย่างเช่น อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ เราจำเป็นต้องรู้อัตราการไหลและอุณหภูมิทางเข้าและทางออกของของไหลทั้งสอง งานของผู้ออกแบบคือ ต้องพยายามผสมผสานพารามิเตอร์ต่างๆ ซึ่งได้แก่ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของเปลือก ความยาวท่อ จำนวนท่อ จำนวนกลับของท่อ (Number of tube passes) และช่องว่างระหว่างแผ่นกันที่จะทำให้ได้การถ่ายเทความร้อนเป็นไปตามที่ต้องการ ในการออกแบบต้องแน่ใจด้วยว่าความดันของของไหลที่ลดลงในระหว่างที่ไหลผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจะไม่มากกว่าระดับที่กำหนดไว้

### 3.3.2 การถ่ายเทความร้อนรวม (Overall transfer of heat)

โดยปกติเราจะไม่พิจารณากระบวนการถ่ายเทความร้อนในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแยกย่อยโดยละเอียด แต่มักจะพิจารณาการถ่ายเทความร้อนรวมกันในรูปของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ( $U$ ) ซึ่งถูกนิยามขึ้นเพื่อใช้ในการหาการถ่ายเทความร้อนรวมของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจากสมการ

$$q = FAU\Delta T \quad (3.12)$$

เมื่อ  $q$  คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนจากของไหล 1 ไปสู่ของไหล 2 ในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (kW)

$F$  คือ Correction factor

$A$  คือ พื้นที่ผิวการถ่ายเทความร้อน ( $m^2$ )

$U$  คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ( $kW/m^2.K$ )

$\Delta T$  คือ ผลต่างของอุณหภูมิของของไหล 1 และของไหล 2 (K)

การคำนวณหาการถ่ายเทความร้อนโดยสมการข้างต้นจะต้องเลือกใช้พื้นที่  $A$  ให้สอดคล้องกับค่า  $U$  กล่าวคือถ้าเป็น  $U$  ที่หามาโดยอ้างอิงกับพื้นที่ผิวด้านใด (ภายในหรือภายนอก) การคำนวณก็ต้องใช้พื้นที่ผิวด้านนั้น

### 3.3.3 ผลต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยเชิงล็อก (Log mean temperature difference)

การคำนวณการถ่ายเทความร้อนโดยใช้สมการในรูป  $q = AU\Delta T$  มีเหตุจูงใจสำคัญคือ ความเรียบง่ายและความสะดวก อย่างไรก็ตามผลต่างของอุณหภูมิมักมีการแปรเปลี่ยนอย่างกว้างขวางและหลากหลายแบบ ดังนั้นการคำนวณการถ่ายเทความร้อนจึงใช้ค่าความแตกต่างอุณหภูมิเชิงล็อก (Log-Mean Temperature Difference, LMTD) ซึ่งแทนด้วยสัญลักษณ์  $\Delta T_m$  ถูกนิยามตามสมการ

$$\Delta T_m = \frac{((T_{h,o} - T_{c,i}) - (T_{h,i} - T_{c,o}))}{\ln \left[ \frac{T_{h,o} - T_{c,i}}{T_{h,i} - T_{c,o}} \right]} \quad (3.13)$$

เมื่อ  $T_{c,i}$  คือ อุณหภูมิของของไหลเย็นที่ทางเข้า (K)

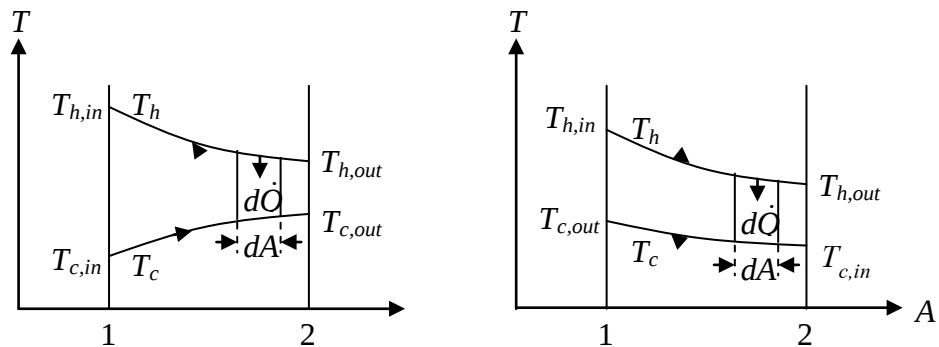
$T_{c,o}$  คือ อุณหภูมิของของไหลเย็นที่ทางออก (K)

$T_{h,i}$  คือ อุณหภูมิของของไหลร้อนที่ทางเข้า (K)

$T_{h,o}$  คือ อุณหภูมิของของไหลร้อนที่ทางออก (K)

โดยการคำนวณ ค่า LMTD มีสมมติฐานดังนี้

1. อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนหุ้มฉนวนดีมากและมีการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของไหลร้อนและเย็นในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเท่านั้น
2. ไม่มีการนำความร้อนตามแนวแกนท่อ
3. ไม่มีการเปลี่ยนแปลงพลังงานศักย์และพลังงานจลน์
4. ค่าความร้อนจำเพาะของของไหลมีค่าคงที่
5. สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมมีค่าคงที่



รูปที่ 3.3 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อติดครีป

### 3.3.4 ความต้านทานต่อการเคลื่อนที่ของความร้อนของคราบสกปรกและสัมประสิทธิ์

#### การถ่ายเทความร้อนรวม (Overall heat transfer coefficient)

อุปกรณ์ที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อน เมื่อมีชั่วโมงการใช้งานมากขึ้นจะมีคราบสกปรก (Scale) มาจับตามผิวของอุปกรณ์เหล่านี้ คราบสกปรกเหล่านี้มีความต้านทานต่อการเคลื่อนที่ของความร้อนด้วย ดังนั้น เมื่อมีคราบสกปรกมาจับที่ผนังจะทำให้การถ่ายเทความร้อนผ่านผนังมีค่าลดลง คราบสกปรกนี้เกิดจากฝุ่นละอองและสิ่งสกปรกอื่นๆที่อยู่ในของไหล ซึ่งจะสะสมอยู่บนผิวของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ความต้านทานต่อการเคลื่อนที่ของความร้อนจากคราบสกปรกจึงมีค่าขึ้นอยู่กับชนิดของของไหล ความสะอาดของของไหล และอุณหภูมิของของไหล ความต้านทานที่เกิดจากคราบสกปรกนี้มีหน่วยเป็นส่วนกลับของสัมประสิทธิ์การพาความร้อน คือ มีหน่วยเป็น  $m^2K/W$  หรือ  $^\circ Fft^2hr/Btu$  ความต้านทานนี้มีชื่อเรียกว่า ฟาวลิงแฟกเตอร์ (Fouling factor) ซึ่งใช้สัญลักษณ์แทนว่า  $R_f$  ในการคำนวณค่าของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ( $U$ ) ต้องคำนึงถึงความต้านทานของคราบสกปรกโดยนำ  $R_f$  มาใช้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมสามารถหาได้ โดยการรวมความต้านทานความร้อนและการพาความร้อนระหว่างของไหลที่ถูกแยกโดยระนาบหลายชั้น และผนัง

ทรงกระบอกต่างๆเข้าด้วยกันและใส่ค่าความต้านทานเพิ่มคือค่า Fouling factor ( $R_f$ ) นอกจากนี้การติดตั้งครีบกั้นผิวเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวยังเป็นการลดความต้านทานความร้อนด้วยดังนั้นจะได้สมการเป็น

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{U_c A_c} = \frac{1}{U_h A_h} = \frac{1}{(\eta_o h_i A)_c} + \frac{R_f}{(\eta_o A)_c} + R_w + \frac{R_f}{(\eta_o A)_h} + \frac{1}{(\eta_o h_o A)_h} \quad (3.14)$$

### 3.3.5 ประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

ประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเป็นอัตราการถ่ายเทความร้อนจริงต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่จะเป็นไปได้ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนนั้น อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดนี้หาได้จากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบของไหลไหลสวนทางกัน ที่มีพื้นที่สำหรับการถ่ายเทความร้อนไม่จำกัดขนาด ( $A \rightarrow \infty$ ) อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนดังกล่าวนี้ ถ้าหากไม่มีการสูญเสียความร้อนให้แก่สิ่งแวดล้อมแล้ว อุณหภูมิของของไหลเย็นที่ไหลออกจากเครื่องก็จะต้องเท่ากับอุณหภูมิของของไหลร้อนที่ไหลเข้าเครื่องเมื่อ  $\dot{m}_c C_{p,c} < \dot{m}_h C_{p,h}$  แต่ถ้าหาก  $\dot{m}_c C_{p,c} > \dot{m}_h C_{p,h}$  แล้ว อุณหภูมิของไหลร้อนที่ไหลออกจากเครื่องก็จะเท่ากับอุณหภูมิของของไหลเย็นที่ไหลเข้าเครื่อง หรือนัยหนึ่งก็คือค่าประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน เป็นตัวเปรียบเทียบอัตราการถ่ายเทความร้อนจริงกับอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ที่อยู่ในขอบเขตกฎข้อที่ 2 ของเทอร์โมไดนามิกส์ ค่าประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนนี้มีค่าเป็น

$$\varepsilon = \frac{q_{act}}{q_{max}} = \frac{C_h (T_{h,i} - T_{h,o})}{C_{min} (T_{h,i} - T_{c,i})} \quad (3.15)$$

ทั้งนี้แล้วแต่ว่าอัตราการจุกความร้อน  $C$  ของของไหลร้อนกับของไหลเย็น ตัวไหนจะมีค่าน้อยกว่ากัน

หรือ

$$\varepsilon = \frac{q_{act}}{q_{max}} = \frac{C_c (T_{c,o} - T_{c,i})}{C_{min} (T_{h,i} - T_{c,i})} \quad (3.16)$$

เมื่อ  $C_{min}$  คืออัตราการจุกความร้อนตัวค่าน้อย (ระหว่างค่า  $\dot{m}_c C_{p,c}$  กับ  $\dot{m}_h C_{p,h}$ )

### 3.4 คุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ของอากาศ

อากาศที่มีไอน้ำเรียกว่าอากาศชื้น ซึ่งคุณสมบัติทางความร้อนของอากาศชื้นมักจะแสดงโดยแผนภูมิไซโครเมตริก

### 3.4.1 ส่วนประกอบของอากาศ

อากาศในบรรยากาศประกอบด้วย อากาศแห้ง ความชื้นในรูปของไอน้ำและสิ่งสกปรก เช่น ฝุ่นละออง และก๊าซต่างๆ ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบของอากาศแห้ง

| Substance                | Molecular Weight | Mole-fraction Composition in Dry Air | Partial Molecular Weight in Dry Air |
|--------------------------|------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|
| Oxygen ( $O_2$ )         | 32.000           | 0.2095                               | 6.704                               |
| Nitrogen ( $N_2$ )       | 28.016           | 0.7809                               | 21.878                              |
| Argon (A)                | 39.944           | 0.0093                               | 0.371                               |
| Carbondioxide ( $CO_2$ ) | 44.01            | 0.0003                               | 0.013                               |
|                          |                  | 1.000                                | 28.966                              |

อากาศแห้งมีเปอร์เซ็นต์ของส่วนประกอบค่อนข้างคงที่จึงถือว่าเป็นก๊าซชนิดเดียวกัน เป็นสถานะที่ใกล้เคียงกับก๊าซในอุดมคติซึ่งสามารถใช้ความสัมพันธ์ต่างๆของก๊าซอุดมคติในการอธิบายสิ่งที่เกิดขึ้น

### 3.4.2 คำจำกัดความ

- อุณหภูมิกระเปาะแห้ง (Dry bulb temperature) คือ อุณหภูมิที่อ่านจากเทอร์โมมิเตอร์ธรรมดา
- อุณหภูมิกระเปาะเปียก (Wet bulb temperature) คือ อุณหภูมิที่อ่านจากเทอร์โมมิเตอร์ซึ่งกระเปาะหุ้มด้วยผ้าเปียก และกระเปาะที่มีผ้าเปียกหุ้มนี้นี้ปะทะกับลมหรืออากาศรอบๆด้วยความเร็วไม่น้อยกว่า 5 เมตรต่อวินาที
- อุณหภูมิจุดน้ำค้าง (Dew point temperature) คือ อุณหภูมิที่ความชื้นในอากาศกลั่นตัวเป็นหยดน้ำ เนื่องจากอากาศถูกทำให้เย็นตัวลง
- เอนทัลปี (Enthalpy) คือ พลังงานซึ่งบอกให้เราทราบถึงปริมาณของความร้อนในอากาศเหนือระดับอ้างอิงใดๆ ระดับอ้างอิงสำหรับอากาศแห้งคือ ศูนย์ฟาเรนไฮต์
- ความชื้นจำเพาะหรือความชื้นสมบูรณ์ (Specific or absolute humidity) คือมวลของไอน้ำที่มีอยู่ต่อหนึ่งหน่วยมวลของอากาศแห้ง

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} \quad (\text{kg water vapor / kg dry air}) \quad (3.17)$$

$$= \frac{P_v V / (R_v T)}{P_a V / (R_a T)} = \frac{P_v R_v}{P_a R_a} = \frac{0.287}{0.4615} \cdot \frac{P_v}{P_a} = 0.622 \frac{P_v}{P_a}$$

ดังนั้น

$$\omega = \frac{0.622 P_v}{P - P_v} \quad (\text{kg water vapor / kg dry air}) \quad (3.18)$$

เมื่อ  $P$  คือความดันรวม

ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity) คืออัตราส่วนระหว่างปริมาณของความชื้นที่มีอยู่ในอากาศและปริมาณความชื้นสูงสุดที่มีอยู่ได้ในอากาศที่อุณหภูมิเดียวกัน

$$\phi = \frac{m_v}{m_g} = \frac{P_v V / (R_v T)}{P_g V / (R_v T)} = \frac{P_v}{P_g} \quad (3.19)$$

เมื่อ

$$P_g = P_{\text{sat}@T} \quad (\text{kPa})$$

เราสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์กับความชื้นสัมบูรณ์ได้ดังนี้

$$\phi = \frac{\omega P}{(0.622 + \omega) P_g} \quad (3.20)$$

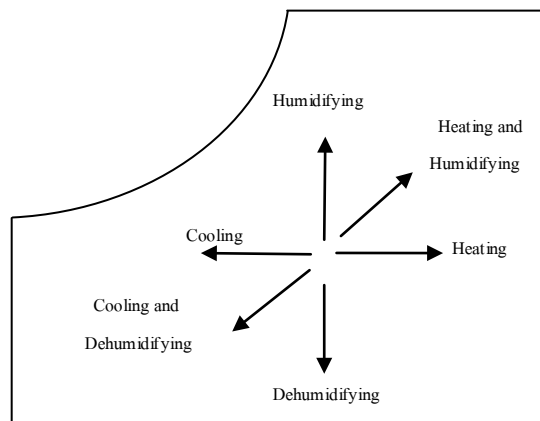
และ

$$\omega = \frac{0.622 \phi P_g}{P - \phi P_g} \quad (3.21)$$

ความชื้นสัมพัทธ์จะมีค่าตั้งแต่ 0 สำหรับอากาศแห้งจนถึง 1 สำหรับอากาศอิ่มตัว ข้อสังเกตคือปริมาณความชื้นที่สามารถมีอยู่ได้ในอากาศจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของอากาศ ดังนั้นความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศจะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิเมื่อความชื้นจำเพาะมีค่าคงที่

### 3.5 กระบวนการปรับอากาศ

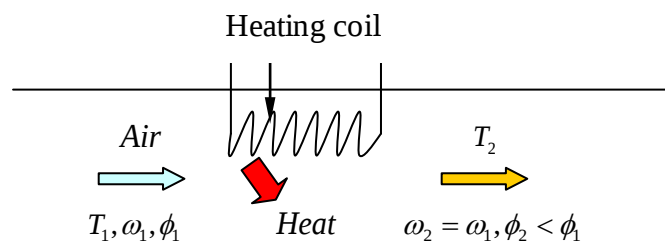
กระบวนการปรับอากาศรวมถึงกระบวนการให้ความร้อนอย่างง่าย (Simple heating) การทำความเย็นอย่างง่าย (Simple cooling) การเพิ่มความชื้น (Humidifying) และการลดความชื้น (Dehumidifying) ในบางครั้งจำเป็นต้องใช้กระบวนการสองกระบวนการหรือมากกว่า เพื่อให้ให้อากาศอยู่ในสถานะที่มีอุณหภูมิและระดับความชื้นตามต้องการ



รูปที่ 3.4 กระบวนการปรับอากาศ

### 3.5.1 การให้ความร้อนและการทำความเย็นอย่างง่าย (Heating and Simple Cooling)

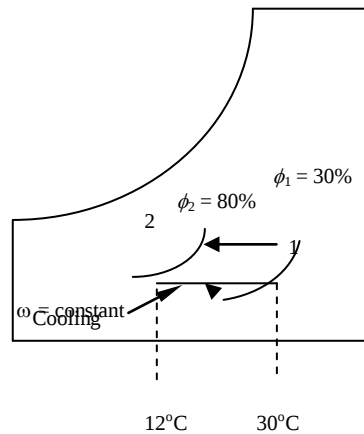
ในระหว่างกระบวนการนี้ปริมาณความชื้นในอากาศจะคงที่ เพราะไม่มีการเติมความชื้นหรือเอาความชื้นออกจากอากาศ นั่นหมายความว่า ค่าความชื้นจำเพาะของอากาศจะมีค่าคงที่ ( $\omega =$  คงที่) ในระหว่างกระบวนการให้ความร้อน (หรือการทำความเย็น) ที่ปราศจากการเพิ่มความชื้น หรือการลดความชื้น กระบวนการจะดำเนินไปในทิศทางที่จะเพิ่มอุณหภูมิกระเปาะแห้งตามแนวเส้นของค่าความชื้นจำเพาะคงที่บนแผนภูมิ Psychrometric ซึ่งปรากฏเป็นเส้นแนวนอนบนแผนภูมิ



รูปที่ 3.5 แผนภาพกระบวนการให้ความร้อนกับอากาศ

ข้อสังเกตคือค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศจะลดลงในระหว่างกระบวนการให้ความร้อน แม้ว่าความชื้นจำเพาะ  $\omega$  จะคงที่ก็ตาม เนื่องจากความชื้นสัมพัทธ์ คืออัตราส่วนระหว่างปริมาณความชื้นกับความจุของความชื้นที่มีได้มากที่สุด ในอากาศที่อุณหภูมิเดียวกัน และความจุของความชื้นจะเพิ่มตามอุณหภูมิ

กระบวนการทำความเย็นที่ความชื้นจำเพาะคงที่จะเหมือนกับกระบวนการให้ความร้อนดังเช่นที่กล่าวข้างต้น เว้นเสียแต่แตกต่างกันที่อุณหภูมิกระเปาะแห้งจะลดลงและความชื้นสัมพัทธ์จะเพิ่มขึ้นในระหว่างกระบวนการ

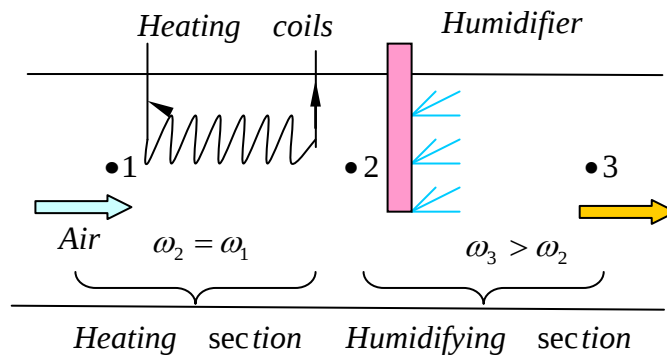


รูปที่ 3.6 แผนภูมิ Psychrometric ของกระบวนการทำความเย็นอย่างง่าย

สมการของกฎอนุรักษ์มวลสารของกระบวนการให้ความร้อนและกระบวนการทำให้เย็นที่  $\omega_1 = \omega_2$  สำหรับน้ำ เมื่อไม่คำนึงถึงงานของพัดลมได้ว่าสมการของกฎอนุรักษ์พลังงานสามารถลดรูปเหลือ  $\dot{Q} = \dot{m}_a(h_2 - h_1)$  หรือ  $q = h_2 - h_1$  เมื่อ  $h_1$  และ  $h_2$  คือ ค่าเอนทัลปีต่อหนึ่งหน่วยมวลของอากาศแห้งที่ทางเข้าและทางออกของส่วนปราศจากการเพิ่มความชื้นหรือลดความชื้นจะลดรูปเหลือ  $\dot{m}_{a1} = \dot{m}_{a2} = \dot{m}_a$  สำหรับอากาศแห้ง และที่มีการให้ความร้อนหรือทำความเย็นตามลำดับ

### 3.5.2 การให้ความร้อนพร้อมด้วยการเพิ่มความชื้น (Heating and Humidifying)

ปัญหาของความชื้นสัมพัทธ์ต่ำเกินไปที่เกิดขึ้นเนื่องจากการให้ความร้อนอย่างง่ายนั้น สามารถแก้ไขได้โดยการเพิ่มความชื้นให้กับอากาศที่ถูกให้ความร้อนนั้นได้โดยการผ่านอากาศเข้าสู่ส่วนให้ความร้อนก่อน (กระบวนการ 1-2) และหลังจากนั้นจึงผ่านเข้าสู่ส่วนเพิ่มความชื้น (กระบวนการ 2-3) ดังแสดงในรูป

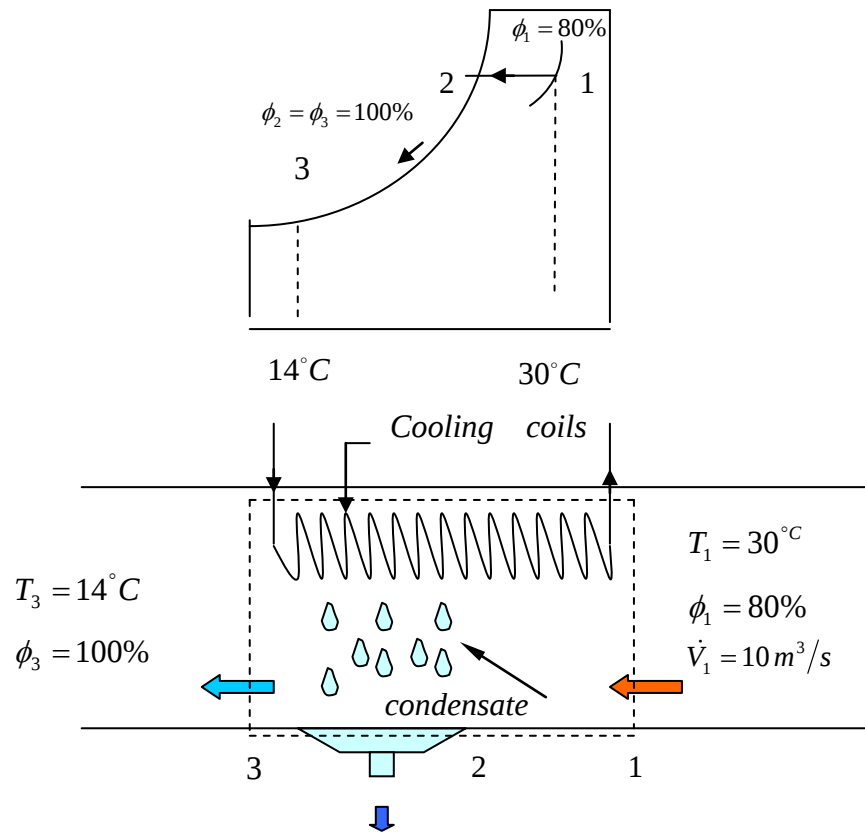


รูปที่ 3.7 แผนภาพการให้ความร้อนพร้อมกับการเพิ่มความชื้น

สถานะที่ 3 นี้จะขึ้นอยู่กับวิธีการเพิ่มความชื้น กล่าวคือ ถ้าไอน้ำถูกป้อนเข้าไปในส่วนเพิ่มความชื้นนี้ อากาศจะมีความชื้นเพิ่มขึ้นและในขณะเดียวกันอุณหภูมิก็จะเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน ( $T_3 > T_2$ ) แต่ถ้ากระบวนการเพิ่มความชื้นทำโดยการฉีดพ่นน้ำเข้าสู่กระแสน้ำของอากาศแทน ส่วนหนึ่งของความร้อนแฝงที่ใช้ในการระเหยน้ำจะได้จากอากาศ ซึ่งจะมีผลทำให้อากาศผ่านการให้ความร้อนแล้วมีอุณหภูมิลดลง ( $T_3 < T_2$ ) ดังนั้น ในกรณีนี้อากาศควรถูกให้ความร้อนจนมีอุณหภูมิสูงกว่าที่ต้องการในส่วนของการให้ความร้อนเพื่อชดเชยอุณหภูมิที่จะลดลงในกระบวนการเพิ่มความชื้น

### 3.5.3 กระบวนการทำความเย็นและลดความชื้น (Cooling and Dehumidifying)

เป็นกระบวนการที่ความชื้นไหลผ่านคอยล์ ซึ่งมีน้ำเย็นหรือสารทำความเย็นไหลอยู่ภายใน โดยผิวคอยล์มีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดน้ำค้างของอากาศ ทำให้เกิดการควบแน่นของอากาศ ซึ่งสามารถอธิบายได้เป็น 3 สถานะคือ สถานะที่ 1 อากาศชื้นจะไหลเข้าส่วนทำความเย็นทำให้อุณหภูมิลดลงแต่ค่าความชื้นสัมพัทธ์มีค่ามากขึ้น ในขณะที่ความชื้นจำเพาะของอากาศคงที่ สถานะที่ 2 อากาศชื้นจะมีอุณหภูมิ ถึงจุดน้ำค้าง (อากาศอิ่มตัว) ถ้าทำให้อากาศชื้นมีความเย็นมากขึ้น จะมีผลทำให้เกิดการควบแน่นของความชื้นส่วนหนึ่งในอากาศ อากาศจะยังคงอยู่ในสภาพอิ่มตัวตลอดกระบวนการควบแน่นและจะดำเนินไปตามแนวเส้นที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 100 % จนกระทั่งสถานะสุดท้าย (สถานะที่ 3) ไอน้ำที่ควบแน่นออกจากอากาศชื้นระหว่างกระบวนการนี้จะถูกกำจัดออกจากส่วนทำความเย็นที่  $T_3$  อากาศที่เย็นและอิ่มตัวที่สถานะ 3 นี้มักจะไหลเข้าสู่ห้องโดยตรง และจะผสมกับอากาศภายในห้อง แต่ในบางกรณีอากาศที่สถานะ 3 อาจจะอยู่ที่ความชื้นจำเพาะตามที่ต้องการแต่มีอุณหภูมิต่ำเกินไป ถ้าเป็นเช่นนั้น อากาศจะต้องไหลผ่านส่วนให้ความร้อนอีกครั้งเพื่อเพิ่มอุณหภูมิของอากาศให้สูงขึ้น จนกระทั่งได้ระดับตามที่ต้องการเสียก่อน ก่อนที่จะปล่อยเข้าห้อง



รูปที่ 3.8 แผนภูมิ Psychometric และแผนภาพการทำความเย็นพร้อมด้วยการลดความชื้น